屋根葺材と屋根雪の凍着性状に関する研究

材料特性と気象要素に基づく凍着過程と凍着強度

STUDY ON THE ADFREEZING PROPERTIES BETWEEN
ROOFING MATERIALS AND SNOW ON ROOFAdfreezing process and adfreezing force basis of materials
properties and meteorological element

伊 東 敏 幸*, 苫米地 司**, 三 橋 博 三***

Toshiyuki ITO, Tsukasa TOMABECHI and Hirozo MIHASHI

In this paper adfreezing properties of roof-snow on roofing materials in a heavy snow region are experimentally studied. We examined the forming process of adfreezing force between the roofing materials and roof-snow taking into consideration of weather conditions. With the data, we made experiments of the adfreezing properties on various roofing materials assuming three models of adfreezing process. Then we identified the adfreezing process for each roofing materials by examining the relation between its surface condition and the adfreezing force. This research has made it possible to obtain basic information about the proper treatment of snow on roofs.

Keywords: roofing material, adfreezing force, adfreezing process, surface property

屋根葺材, 凍着強度, 凍着過程, 表面性状

1. はじめに

積雪地域においても通年利用が可能な運動施設, あるいはアトリウム空間を持つ建築物が建設されるなど, 建築空間の多様化および大規模化がみられる。これらの建築物を積雪地域に建設する場合, 屋根上の積雪を適切に処理することが不可欠であり, 特に大規模建築物あるいは透光性を要求される屋根を持つ建築物における屋根雪処理は重要な課題と言える。

屋根雪を処理する方法として, 落雪型屋根を採用して屋根雪を滑雪処理しようとするとき, 屋根葺材と屋根雪との滑雪抵抗力が屋根雪滑落に大きく関わる¹⁾。この滑雪抵抗力の中で最も大きな力として作用するのは, 屋根雪と屋根葺材とが低温下で氷結付着することにより発生する凍着抵抗力であり, この凍着抵抗力が作用する場合, 屋根雪の滑雪は阻止され, それ以降の積雪は屋根上に滞留し, 屋根上の過剰荷重や屋根面の透光性低下につながる。さらにこの現象は不規則な屋根雪滑落を生じさせ, 屋根雪落雪による事故発生にも影響する^{2, 3)}。また, 屋

根上積雪荷重の評価面においても, 以前までは屋根勾配が30度を越える場合, および雪おろしの習慣がある地方に限って積雪荷重の軽減が認められていた。しかし, 融雪や滑雪などによる信頼できる屋根雪処理が保証される場合, 積雪荷重を軽減出来ることが1993年に改訂された日本建築学会の荷重指針では可能となっている⁴⁾。この荷重軽減を規則的な滑雪処理によって行うことを考えると, 屋根雪滑雪に作用する凍着抵抗力の評価が重要となる。

これまでの屋根雪の滑雪に関する研究をみると, 屋根雪滑雪に作用する力学的実験によって氷点下での屋根雪の付着力が滑雪抵抗力を大きく支配し, この付着力は降雪後の最低温度に依存することが指摘されている⁵⁾。また, 自然積雪時の滑雪性に及ぼす屋根雪と屋根葺材との凍着強度あるいは摩擦係数などの依存度が各種材料別に示されている⁶⁾。雪の付着強度特性については, 雪の付着温度, 雪密度および雪粒径が及ぼす付着強度への影響が明らかとなっている⁷⁾。さらに, 各種の屋根葺材にお

* 北海道工業大学建築工学科 助手

** 北海道工業大学建築工学科 助教授・工博

*** 東北大学工学部建築学科 教授・工博

Research Assoc., Dept. of Architecture, Hokkaido Institute of Technology
Assoc. Prof., Dept. of Architecture, Hokkaido Institute of Technology, Dr. Eng.
Prof., Dept. of Architecture, Faculty of Engineering, Tohoku Univ., Dr. Eng.

いて、表面粗さと温度別の摩擦特性が明らかにされ⁹⁾、滑雪屋根での劣化後は表面粗さおよび滑雪性が変化する⁹⁾ことが報告されている。このように、屋根雪の滑雪処理に対する研究は少なくないが、対象としている屋根葺材が金属板あるいは有機被覆金属板に限られており、透光性に優れる膜材あるいはガラス材などを対象とした研究^{10, 11)}は少ない現状にある。また、これまでの凍着に関する研究では、屋根雪が凍着するときの温度推移や雪質状態からみた凍着過程の分析が行われていない。さらに、屋根葺材の表面粗さ以外の表面性状を用いて屋根雪の凍着性を検討している研究¹²⁾も極めて少ない現状にある。

これらのことから、降雪時の屋根面で発生する凍着現象の発生過程を、実測した屋根面温度推移から評価すること、さらに、透光性に優れる材料を含めた各種屋根葺材を対象とした材料表面性状と凍着性との関係を検討することが必要と言える。本研究の目的は、自然降雪下での屋根面温度の推移を明らかにし、それに基づいた凍着強度と各種屋根葺材の表面性状との関係を明らかにすることである。そこで本論文では、冬期間の屋根面温度を実測し、屋根面上の融雪状態から屋根雪の凍着過程を明らかにした。さらに、その結果に基づいて屋根雪の凍着過程を3種類にモデル化すると共に、各種屋根葺材の凍着強度と材料表面性状との関係を検討した。

2. 屋根面温度の測定方法

降雪時の屋根面温度は屋根葺材と屋根雪の凍着過程に大きく影響することから、実験建物を屋外に設置し、降雪下における屋根面温度を実測した。設置した試験体は図-1に示す通りで、床面積は2.43m²(1.8m×1.35m)である。設置場所は札幌市手稲区の地上高さ約8mの建物屋上とし、試験体の屋根は屋根雪が規則的に自然滑落し易いように、勾配を0.4、屋根葺工法を一文字葺、屋根葺材を塗装亜鉛めっき鋼板とした¹³⁾。試験体は切妻屋根に小屋裏を設け、小屋裏温度を調整できるように室内空気を小屋裏に直接供給するための通気口を天井に取り付け、小屋裏換気のために軒裏および妻側壁に開閉式の換気口を取り付けた。なお、室内は電気ヒーターで温度を25～28℃に保つようにした。

屋根面温度の実測は、図-1に示すように、試験体の東側屋根の棟部、中央部および軒部の3カ所の屋根葺材裏面に熱電対を貼り付けて測定した。また、屋根面温度のほかに小屋裏温度、室内温度および外気温を測定した。屋根雪の有無および雪質状態はビデオカメラおよび目視によって観察した。さらに、屋根面温度は日射や風の影響を受けることから、日射量、平均風速および最大風速を併せて観測した。これらの測定装置の設置状況は写真-1に示す通りであり、1993年12月から翌年3月まで観

測した。

屋根雪の凍着過程に及ぼす屋根面温度の影響を分析するには、数時間毎の降雪有無を知る必要がある。特に札幌市における降雪現象は夜間に多くみられる¹⁴⁾ことから、夜間における降雪現象を数時間毎に確認しなければならない。この場合、一般に夜間の積雪深観測が困難なことから、雨量観測データを用いて推定することが有効と考える。従って本研究では、設置した試験建物から北西方向約800m地点にある札幌市手稲山口の地域雨量観測所で、1時間毎に1mm単位で観測されている雨量データを用いて降雪現象を判定した。降雪の判定は降雨現象のあった日を除いた日を対象とし、雨量の観測値があった時刻を降雪現象があった時刻とした。なお、観測降雨量1mmは概ね降雪の深さ1cmに換算される。

3. 降雪開始時前後の屋根面温度

3.1 屋根面温度に及ぼす気象要素

図-1 屋根面温度測定用試験体の概要

写真-1 試験体の設置

降雪開始時の屋根面温度に影響すると考えられる外気温、小屋裏温度、日射、風および屋根上積雪深を実測結果から整理する。観測期間中における夕方から始まる降雪の代表的な例として、連続的に降雪のあった2月12日8時から2月15日8時までの試験体各部温度および気象データの推移を図-2に示す。図のように棟部、中央部および軒部の屋根面温度は各々次のような影響を受けて温度変化していることが分かる。

降雪前で屋根上に積雪のない状態で日射がある12日9時～14時では、いずれの屋根面部位も同様な温度変化を示す。しかしその後、日射量の減少と共に外気温が低下して降雪が始まる15時以降では、棟部および中央部では小屋裏温度が影響して0℃付近で推移する。これに対し軒部では小屋裏温度の影響が少なく、外気温に追従する温度低下がみられる。このときの各部の屋根雪状態を確認してみると、棟部および中央部では融雪水が発生した状態で屋根面に殆ど凍着していない。一方、軒部では若干融雪した状態で屋根面に凍着している。なお、このときに棟部および中央部の融雪水が軒部へ流下する現象はみられなかった。このように、降雪開始直後の屋根面温度は屋根雪と屋根葺材との界面に生ずる水分量に大きく影響し、その後の凍着過程に深く関わると言える。

小屋裏温度の変化は13日10時までにみられるように、平均風速が約3 m/s 以下ではプラス温度であるが、それ以後にみられるように、風速が約4 m/s 以上になると外気温に近い温度になる。このことは比較的強い風が影響

して小屋裏の換気回数が増えることによる現象である。このような現象で小屋裏温度が低下すると、13日18時～14日14時までにはみられるように、棟部および中央部においても材温が氷点下となり、屋根雪の凍着現象が起こる。

屋根面温度に及ぼす気象要素の一般的な影響は、屋根面温度を目的変数、気象観測項目を説明変数とする重回

図-2 降雪時の各部温度と気象データの実測例

図-3 降雪時の外気温および屋根面温度の分布

帰分析から得られる標準偏帰係数でみると次のようになる。軒部屋根面に対しては外気温(0.59), 日射量(0.49), 日照時間(0.13), 最大風速(-0.07)の順となり, 棟部屋根面に対しては日射量(0.55), 外気温(0.43), 最大風速(-0.21), 日照時間(0.14)の順になる。以上のように, 降雪開始前後の屋根面温度は外気温, 日射および風の影響を大きく受けることによって, 屋根面部位による温度差が生じている。部位別にみた屋根面温度は, 小屋裏の熱が余り伝わらない軒先付近およびケラバ付近では主に外気温の影響を受け, 小屋裏の熱が伝わる棟部付近では日射量および風速の影響が軒部よりも強い傾向にある。

3.2 降雪時における屋根面温度の分布

降雪開始後の屋根面温度が屋根雪凍着に大きく影響すること, さらに屋根面の棟部および中央部と軒部では温度が異なることから, 比較的多量の降雪があった日における外気温および屋根面温度の分布を検討する。屋根面温度の実測を行った12月～3月までに, 降雪開始後6時間以内に3時間以上の降雪(以後, 連続降雪と言う)があった日は, 屋根上に積雪がない状態が16回, 屋根上に積雪がある状態が6回である。これらの22回を対象として, 降雪が確認された時刻を基点とする3時間前から12時間後の外気温と屋根面温度の中央部および軒部の1時間毎の温度分布をみると図-3となる。図は各時間毎に該当する温度範囲の度数分布を示している。

連続降雪のあった日の降雪開始前後における時間毎の外気温分布をみると, 降雪2時間前は+1～+2℃および-8～-2℃が多く, 降雪開始時は-0.5～0℃および-8～-2℃が多い。その後2時間は同様となり, 降雪開始5時間後以降になると-8～-2℃に集中する。軒部屋根面の温度分布をみると, 降雪2時間前は+4～+8℃および-8～-2℃が多く, 降雪開始直前には-0.5～0℃および-8～-2℃が多い。その後の降雪開始2時間後も同様の温度分布となるが, 降雪開始8時間後には-8～-2℃に集中する。この傾向は外気温分布に近似している。小屋裏暖気の影響を大きく受ける屋根面中央部の温度分布をみると, 降雪2時

間前は+1～+4℃, -0.5～0℃および-8～-4℃が多く, 降雪直前には-0.5～+1℃および-8～-4℃が多くなり, 軒部屋根面よりも高い温度を示す。その後の降雪開始2時間後は-0.5～+0.5℃および-4～-2℃が多く, 降雪開始8時間後まで同様の傾向を示す。

3.3 降雪時における屋根面温度の推移

降雪開始時から降雪開始後における屋根面の温度変化は, 屋根雪の融雪に関わり, 凍着する屋根雪の雪質状態に大きく影響する。このことから, 前項と同じ連続降雪のあった22回における降雪開始前後の外気温および屋根面温度の推移を分析すると以下のようになる。

連続降雪のあった各日における外気温, 軒部屋根面および中央部屋根面の温度推移曲線の中から, その頻度が高い推移曲線を図-4に示す。外気温の温度推移をみると, その頻度が多いのは次の2通りの型である。一つは降雪開始前にプラス温度であった気温が次第に低下し, 降雪開始時にはマイナス温度になり, その後3～5時間で-2℃以下に低下する型で, 昼間に降雪が始まる日に多くみられる。もう一方は, 降雪前から-8～-2℃で, 降雪中もそのまま殆ど変化せずに推移する型で, 夜間から始まる降雪日に多くみられる。なお, 屋根上に積雪がある状態での降雪日は全てこの型に含まれる。

軒部屋根面の温度推移をみると, 次の4通りの型の頻度が高い。昼間に日射の影響により+4℃以上である場合には, 降雪直前に0℃より若干低下してそのまま推移する型と降雪中に-2℃以下に低下して推移する型がある。この場合, 前者は外気温が0～-2℃で比較的多量の降雪日, 後者は夕刻に始まる少量の降雪日に多くみられる。他の2つの型は降雪数時間前のプラス温度が降雪直前に-2℃以下まで低下する型と降雪前から-2℃以下で降雪後もそのまま推移する型である。この場合は, 前者は夕刻に始まる降雪日, 後者は屋根上に積雪がある状態での降雪日および深夜に降雪が始まる日に多くみられる。

中央部屋根面の温度推移は次の3通りの型の頻度が高い。第1の型は日射および小屋裏温度の影響により+2℃以上の温度が, 降雪開始時に0℃付近まで低下し, 降雪

図-4 降雪開始時前後における代表的な温度推移

開始約3時間後に-1～0℃まで低下して推移する型である。この型は夕刻に始まる降雪日に多くみられ、降雪後6時間頃になると降雪量が多い日は0℃に近く、降雪量が少ない日は-1℃に近くなる場合が多い。第2の型は降雪前が 0 ± 0.5 ℃で降雪開始2時間後までは若干低下し、その後は-2～+0.5℃で推移する型であり、外気温が約-4℃以上、あるいは屋根上に積雪のある状態で風速が約3m/s以下の日にみられる。第3の型は降雪前に-8～-4℃である温度が降雪開始後に-4～-1℃に上昇して推移する型である。この型は降雪前から外気温が-4℃以下で推移する日、および屋根上に積雪のある状態で風速が約4m/s以上の日にみられる。なお、降雪開始後の屋根面中央部にみられる温度上昇は屋根上積雪による屋根面の保温効果の結果と考えられる。以上のように、降雪開始時の屋根面の温度推移は気象要素の影響を受けて屋根部位により異なる傾向を示し、各々いくつかの型に分けられる。

4. 屋根雪の雪質状態と凍着過程

4.1 降雪時の温度推移からみた屋根雪の雪質状態

前述のように降雪開始前後の屋根面温度は気象因子に影響されて屋根部位によって異なり、凍着するときの屋根雪下面の雪質状態にも大きく影響することから、凍着する屋根雪下層の雪質状態を検討する。

まず、降雪時の外気温と新雪密度の関係¹⁵⁾から積雪する雪質状態を整理する。降雪時の外気温は図-4に示したように、降雪直前でマイナス温度に下がる場合、および降雪前から-4℃以下で推移する場合があることから、降雪する雪質状態は次のように考えられる。外気温が0℃付近での降雪では新雪密度が $0.1 \sim 0.2 \text{ g/cm}^3$ 程度の比較的湿った雪となり、-4℃以下での降雪では新雪密度が $0.05 \sim 0.15 \text{ g/cm}^3$ 程度の比較的乾いた雪となる。また、この雪質の違いは降雪時の温度に影響されることから、降雪時期に関わり、12月および3月では湿り雪が比較的多く、1月および2月では乾いた雪が比較的多くなる。

次に、前述した屋根面温度および実験建物の屋根雪を目視観察した結果から屋根雪状態を評価する。軒部屋根面においては、降雪直前にプラス温度であった屋根面が降雪開始後にマイナス温度になる場合と、降雪開始前後ともにマイナス温度で推移する場合がある。前者の場合は、降雪初期の雪が屋根面上で若干融けて融雪水が若干発生した状態となり、その後の急速な温度低下で屋根雪が凍着する。後者の場合は、屋根面がマイナス温度の状態で比較的乾いた雪が降ることから、この状態では余り凍着しない。しかし、棟側の水分を多く含んだ屋根雪が滑雪移動し、軒先部で凍着することがある。屋根面中央部および棟部においては、降雪前から降雪開始後数時間までプラス温度で推移した後にマイナス温度になる場合と、降雪前からマイナス温度で降雪開始後もそのまま推

移する場合がある。これらの温度推移の傾向は軒部屋根面と同傾向であるが、降雪開始後の数時間における温度推移が異なる。すなわち、屋根面の中央部および棟部では降雪開始後数時間がプラス温度で推移し、この状態の時に屋根雪が多分に融雪され、融雪水を多く発生させた後に、マイナス温度となって屋根葺材に凍着する。なお、このときの凍着温度は0℃に近い温度が多い。このように、屋根雪が凍着するときの屋根雪下面の雪質状態は、その融雪程度により水分量の異なる状態で凍着する。

4.2 凍着過程のモデル化

これまでの外気温および屋根面温度の分析結果を基に、屋根葺材と屋根雪との凍着過程を整理して模式化すると図-5となる。図に示す湿潤凍着は、外気温が0℃付近で比較的湿った積雪がプラス温度の屋根面上で多分に融解し、十分に湿潤状態となり、その後の外気温低下によって凍着する場合、あるいは湿潤状態の雪が棟側より軒側へ滑雪移動してくる場合に起こる。一方、乾燥凍着は外気温が-5℃前後で比較的乾燥した積雪がマイナス温度の屋根面上に堆積する場合に起こる。また、両者の中間的な状態である準湿潤凍着は、外気温および屋根面温度の影響によって屋根雪が若干融雪した状態で凍着する場合に起こる。

以上のようにして発生した凍着強度の降雪後の変化を、降雪開始後の外気温の分布および推移を基に考えると次のようになる。凍着後の外気温がマイナス温度で推移する場合には凍着強度が維持されて屋根雪が滑雪しないのに対し、凍着後に外気温がプラス温度になる場合は凍着強度が軽減されて滑雪し易くなる。すなわち、外気温がマイナス温度で降雪が継続する場合、軒部の凍着強度が軽減されないことから、屋根葺材と屋根雪の間に発生する大きな滑雪抵抗力である凍着強度を軽減させない限り屋根雪の滑雪は生じないことになる。従って、一定積雪量で規則的に屋根雪を滑雪させるには、屋根雪と屋根葺材との間に発生する凍着強度を人工的に低減する必要がある。

図-5 降雪時の屋根面温度を考慮した凍着過程

ある。さらに、エネルギー供給などによる凍着強度の低減を行うには、図－5に示した3通りの凍着過程を考慮して各種屋根葺材別の凍着強度を評価する必要がある。

5. 凍着強度および材料表面性状の測定方法

屋根雪が屋根面に凍着するときの過程は、先に示したように凍着時の屋根雪下層の水分量の差異によって湿潤状態での凍着、乾燥状態での凍着および両者の中間的な状態での凍着の3通りに分けられる。そこで、これらの凍着過程に基づくモデル凍着実験を行い、透光性あるいは耐久性に優れる数種の屋根葺材を対象とし、凍着過程別の凍着強度を実験的に検証した。さらに、凍着強度に影響する材料の表面性状を測定して凍着強度との関係を検討した。

5.1 凍着強度の測定方法

凍着強度の測定に供した屋根葺材は耐久性、透光性および汎用性を考慮した表－1に示す材料とした。これらの屋根葺材試料の大きさは20cm×90cmで、厚さ24mmの合板上に密着固定している。なお、本論文では材料名称を表－1に示す略称名で表現する。

各種屋根葺材の凍着強度測定は水平滑雪実験装置を用い、図－6に示すように試料上に凍着させた雪氷体をせん断剥離させる方法で測定した。試料表面への雪氷体の凍着方法は、降雪時および凍着時の屋根面温度の実測結果を基に決定した。すなわち、凍着時の屋根葺材表面の水分状態からモデル化した以下に示す湿潤凍着、準湿潤凍着および乾燥凍着の3通りの方法で凍着させた。

湿潤凍着は屋根葺材上に内径31mmの塩ビ管を置き、この塩ビ管内に高さ10mmまで水道水を注ぎ、所定の冷却温度で凍着させた。準湿潤凍着は同様の塩ビ管内に予め氷を作製し、この氷下面に均一に水道水を噴霧した後、屋根葺材上に載せて凍着させた。乾燥凍着は同様に塩ビ管内に氷を作製し、この氷をそのまま屋根葺材上に載せて凍着させた。なお、使用した水道水から作製される氷は

多結晶氷である。屋根雪が凍着するときの屋根面温度については、先に示した屋根面温度の実測結果から判るように、屋根雪が凍着するときの屋根面温度は0℃付近から-8℃付近の間に分布している。このことから、本実験における冷却温度は凍着上限温度のに近い-2℃、および-8℃に近く札幌市の2月の最低気温に近い-10℃の2通りに設定した。また、これらの温度での凍着時間は、湿潤凍着において水が完全に氷結して凍着面温度が室温と同温になり、それ以後の凍着強度が殆ど変化しなくなるときの経過時間を予備実験から定めた。凍着時間は-10℃で3時間、-2℃で8時間に設定した。

このような方法によって凍着させた雪氷体に極めて低速の水平方向荷重を加え、雪氷体をせん断剥離させ、せん断剥離したときの最大荷重を塩ビ管内部の断面積で除して凍着強度を求めた。凍着強度は同一条件で5回測定した結果の平均値を用いた。凍着強度は測定平均値の±10～40%程度のバラツキがみられるが、凍着方法および材料別の凍着強度比較に対して影響のない範囲と考える。

5.2 表面性状の測定方法

各種屋根葺材の凍着強度に影響すると考えられる表面性状として次の2つの性状を測定した。すなわち、材料表面の微細形状である表面粗さ、および材料表面の撥水性の指標となる液滴の接触角を測定した。

表面粗さは屋根葺材を5cm×5cmの大きさに切除した測定用試験片を用い、触針式表面粗さ測定器にて測定した。

図－6 凍着強度の測定装置

表－1 屋根葺材試料の概要

試料No	試料名称	略称名	分類	表面粗さRz
M1	四フッ化エチレンコーティングガラス繊維布	膜材	高分子材	21.84
P1	ポリエステル樹脂塗装溶融亜鉛めっき鋼板 JIS G3312	カラー亜鉛鋼板	高分子被覆金属材料	1.16
P2	塗装溶融亜鉛-5%アルミニウム合金めっき鋼板 JIS G3318	カラーガルファン		2.64
P3	フッ素樹脂塗装溶融亜鉛めっき鋼板 JIS G3312 3類	フッ素鋼板		3.10
S2	塗装ステンレス鋼板 JIS G3320	カラーステンレス		4.30
S1	冷間圧延ステンレス鋼板 JIS G4305	ステンレス	金属材料	3.82
Z1	亜鉛合金板	亜鉛板		7.98
G1	フロート板ガラス JIS R3202	フロートガラス	ガラス材	0.03
G2	磨き板ガラス JIS R3202	磨きガラス		11.63

測定は任意の3点において直交する2方向のRz(10点平均粗さ)をJIS B 0601の試験法にて測定し、その平均値を用いた。Rzの測定実測値は測定平均値の±10%の範囲内に納まる。

接触角は表面粗さ測定と同じ試験片を用い、自動接触角計にて測定した。測定には蒸留水とパラフィンの2種類の液体を用い、両者の接触角から材料の表面自由エネルギーを求めた。なお、接触角は液滴落下後10, 30, 60秒経過時の測定結果から、液滴の形状が最も安定した60秒後の値を採用し、3回の測定平均値を用いた。なお、接触角のバラツキは測定平均値の±5%の範囲内である。

6. 凍着面の水分量と凍着強度

フロートガラス(試料G1)、カラー亜鉛鋼板(試料P1)および膜材(試料M1)における凍着過程と凍着強度との関係を図-7に示す。これらの試料は表面粗さRzおよび試料分類の異なるものである。図のように、フロートガラスおよびカラー亜鉛鋼板は何れの温度においても乾燥状態、準湿潤状態、湿潤状態の順に凍着強度が顕著に高くなる。同様に、膜材の凍着強度は乾燥状態よりも準湿潤状態が高くなるが、準湿潤状態と湿潤状態は余り変化しない。このように、材料および凍着界面に介在する水分量によって凍着強度は大きく異なる。

凍着界面の水分量が凍着強度に影響する要因を考えると、屋根葺材と雪氷体との界面状況を図-8のような模式図で表わすことができる。図のように、雪氷体との界面に十分な水分が介在する湿潤凍着では材料あるいは雪氷体表面の形状に沿って密実に凍着し、凍着面積が最大となり凍着強度も大きくなる。一方、乾燥凍着では屋根葺材あるいは雪氷体の凸部に限られる部分的な凍着となり、凍着面積が減少して凍着強度が小さくなる。準湿潤凍着では両者の中間となる。これらのことを材料の表面粗さから考えると、膜材や亜鉛板のように表面粗さが大きい材料の場合は材料表面の凹凸が主に影響するのに対し、フロートガラスのように表面粗さが小さい材料の場合は主に雪氷体の凹凸が影響すると考えられる。このように、凍着面積や凍着強度は材料表面の形状に影響され、凍着時の界面水分量に応じて変化する。

7. 材料の表面性状と凍着強度

7.1 表面粗さと凍着強度の関係

凍着強度は材料の表面形状に影響されることから、材料表面の表面粗さRzと凍着強度との関係をみると図-9となる。図のように、フロートガラス(試料G1)および膜材(試料M1)を除く試料では、Rzの増加に伴い凍着強度が増加する傾向を示す。この傾向から外れる膜材は、Rzが他試料よりも著しく大きいにも関わらず、凍着強度が小さな値となる。このことの要因は、膜材の表面形状が他

の材料と異なり、膜材内部の繊維によって生ずる丸みを帯びた凸部が広い間隔(約1mm)で形成されていることが氷結凍着の過程で何らかの影響を及ぼしていると考えられる。前述の傾向から外れるもう一つの材料であるフロートガラスは、他試料よりもRzが小さいにも関わらず、凍着強度が大きな値を示す。この要因は、氷結凍着時に影響する表面粗さ以外の表面性状と考えられる。

凍着強度測定において、雪氷体の剥離後の材料面を観察した結果、対象とした屋根葺材中で表面粗さが比較的大きい磨きガラス(試料G2)における凍着温度-10℃の湿潤状態で凍着させた場合に限って、雪氷体が試料上に部分的に残留付着している現象がみられた。この現象は材料表面から雪氷体が剥離せずに、雪氷体の下層部でせん

図-7 凍着方法別の凍着強度

図-8 凍着方法別の凍着界面状態

図-9 表面粗さRzと凍着強度の関係

断破壊が生じたことによるものである。すなわち、凍着強度が雪氷体のせん断強度を上回っていたことを示す。

7.2 表面自由エネルギーと凍着強度の関係

前項では屋根葺材の表面粗さと凍着強度を検討し、表面粗さの増加に伴う凍着強度の増加傾向を示した。しかし、前述のように膜材およびフロートガラスにおいては、表面粗さと凍着強度の関係が他試料と異なる傾向が確認された。そこで本項では、これら異なる傾向を示す材料並びに雪氷体付着には界面の水分量が影響することを考慮し、材料表面性状として、液滴との接触角を用いて凍着強度との関係を検討する。

材料表面における液滴とのぬれ、付着および接着などを支配する重要な要因の一つに表面自由エネルギーがある。一般に、固体上に液体を滴下した場合、表面自由エネルギーが大きいほど固-液界面が広がろうとするのでぬれ易い性質にある。この表面自由エネルギーは次式で求められると仮定し、液滴との接触角を用いて求める解析法¹⁶⁾がある。

$$\gamma_s = \gamma_s^d + \gamma_s^p \quad \dots\dots\dots(1)$$

ここで、 γ_s^d はファンデルワールス力ないしロンドン分散力である分散成分、 γ_s^p は双極子間力ないしクーロン静電力である極性成分を意味する。 γ_s^d および γ_s^p は図-10に示す固体表面上で安定する液滴に作用する力の釣合式、接着仕事の式、さらに界面張力に関する式を組み合わせることによって求められる。本研究では無極性液体としてパラフィン(La)、極性液体として蒸留水(Lb)を用い、各々の測定した接触角から γ_s^d および γ_s^p を次式によって求めた。

$$\gamma_s^d = \gamma_{La}^d (1 + \cos \theta_a)^2 / 4 \quad \dots\dots\dots(2)$$

$$\gamma_s^p = \{ (\gamma_{Lb}^d + \gamma_{Lb}^p)(1 + \cos \theta_b) - 2(\gamma_s^d \cdot \gamma_{Lb}^d)^{1/2} \}^2 / 4 \gamma_{Lb}^p \quad \dots\dots\dots(3)$$

ここで、(2)式に示す γ_{La}^d はパラフィンの分散成分、 θ_a はパラフィンで測定した接触角を表し、(3)式に示す γ_{Lb}^d は蒸留水の分散成分、 γ_{Lb}^p は蒸留水の極性成分、 γ_s^d は(2)式で求めた固体表面の分散成分、 θ_b は蒸留水で測定した接触角を意味する。なお、 γ_{La}^d 、 γ_{Lb}^d および γ_{Lb}^p は既知値を用いた。

各種屋根葺材の表面自由エネルギーと蒸留水の $\cos \theta$ との関係を見ると図-11になる。図中の $\cos \theta$ は1.0に近づくに伴い材料表面の親水性が強く、0.0に近づくに伴い材料の撥水性が強いことを示す。図のように、今回用いた試料においては $\cos \theta$ が1.0に近い材料ほど表面自由エネルギーが増加する傾向にあり、水の接触角と表面自

由エネルギーの相関性がみられる。この傾向を図-12に示すような固体と液体の界面に生ずる「ぬれ形式」¹⁷⁾で説明すると、高分子材および高分子被覆金属材は撥水性が比較強いいため、材料表面と水との間で互いに分離しようとする「付着ぬれ」が生じるのに対し、ガラス材は親水性が強いために材料表面上で液滴が広がろうとする「拡張ぬれ」が生じる。このぬれ形式が及ぼす凍着強度への影響を考えると、付着ぬれに比べて拡張ぬれの方が材料表面上で水が拡散し易いことから、材料表面上の付着面積が大きくなり、雪氷体の凍着強度が大きくなると言える。

次に、各種屋根葺材の表面自由エネルギーと湿潤状態での凍着強度との関係を見ると図-13になる。図のように、表面自由エネルギーの大きな材料は凍着強度が大きくなる傾向にある。ここで、図-9で示した表面粗さRzと凍着強度の関係から外れたフロートガラス(試料G1)お

図-10 固体表面上の液滴に作用する力

図-11 接触角と表面自由エネルギーの関係

図-12 固体表面上のぬれ形式

図-13 表面自由エネルギーと凍着強度の関係

および膜材(試料M1)についてみる。Rzが極めて小さいにも関わらず凍着強度が大きかったフロートガラスは、表面自由エネルギーが約 72erg/cm²であり全試料中で最大となっている。この要因は、ガラス材は親水性に優れる材料であり、先に示した拡張ぬれの性質が作用して微細な表面凹凸内にまで浸水することにより凍着強度が大きくなると考える。一方、Rzが極めて大きいにも関わらず凍着強度が小さかった膜材は、表面自由エネルギーが40erg/cm²以下であり全試料中で最小となっている。この要因は、高分子材の膜材は撥水性が大きいため、屋根葺材と雪氷体との界面が完全に水で満たされない状態、すなわち空隙のある状態で凍着したために凍着面積が小さくなることが影響していると考えられる。このように、屋根葺材の凍着強度は材料の表面粗さRz以外に、表面自由エネルギーにも大きく支配される。

以上のように、滑雪型屋根に用いられる屋根葺材における雪氷体の凍着性は、雪氷体との付着面積に大きく影響する表面粗さと材料表面の撥水性に大きく影響する表面自由エネルギーの両者を用いることにより評価できる。すなわち、屋根雪滑雪の大きな抵抗力である凍着強度の発生を最小限にするには、屋根葺材の素材に表面自由エネルギーの小さな材料を用い、雪氷体との付着面積を最小にするために材料表面を平坦に仕上げた屋根葺材が望ましいと言える。また、屋根雪を規則的に滑雪させて屋根雪荷重を制御するには、建築物における屋根面温度を気象要素および屋根構法などから推定して屋根雪の凍着状態を推定し、その状態における凍着強度を軽減する方策を確立することが重要と言える。

8. まとめ

屋根上積雪の滑雪抵抗力として最も大きく作用する凍着抵抗力の発現過程を明らかにすること、並びに各種屋根葺材における凍着強度と表面性状の関係を明らかにすることを目的に、降雪時の屋根面温度の分析および各種

屋根葺材を対象とした凍着実験を行った。その結果、屋根面に生ずる凍着強度には、降雪時の気象条件や屋根部位の差異によって生ずる屋根雪の水分量、屋根葺材の表面粗さとその形状および屋根葺材の表面自由エネルギーが影響していることが判った。このことから、屋根雪の凍着強度を最小限にするには屋根葺材の素材に表面自由エネルギーの小さな材料を用い、材料表面を平坦に仕上げた屋根葺材を用いることが有効と言える。また、一定積雪量内で屋根雪を規則的に滑雪させて屋根雪荷重を制御するには、降雪時の屋根面温度を建物の立地気象条件あるいは屋根構法などから屋根部位別に屋根雪の凍着状態を推定し、効率的に熱エネルギーを供給するなどして凍着強度を軽減することが有効と考える。

本研究の実施にあたり、接触角の測定に際して北海道立工業試験場の吉田光則氏のご指導を頂きました。また、本研究の一部は1993年度文部省科学研究費補助金一般研究Cによって実施したものであります。ここに、記して感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 高橋 博, 中村 勉: 雪氷防災, 白亜書房, pp.240-248, 1986
- 2) 苔米地司, 伊東敏幸, 山形敏明, 高橋章弘: 屋根雪の落雪事故からみた屋根葺材の滑雪特性, 第6回寒地環境工学合同シンポジウム講演論文集, pp.154~159, 1993.4
- 3) 苔米地司, 山形敏明, 高橋章弘: 北海道における雪害に関する基礎的研究, 日本建築学会計画系論文報告集, 第447号, pp.61~68, 1993.5
- 4) 日本建築学会編: 建築物荷重指針・同解説, pp.197-200, 1993
- 5) 前田博司: 金属屋根における積雪の滑落, 雪氷, 41巻3号, pp.39~44, 1979.9
- 6) 上野 学, 高島和希, 高村久雄, 福本博光: 雪氷に対する屋根鋼板の特性評価, 雪氷, 49巻3号, pp.131~137, 1987.9
- 7) 清水増治郎, 木村忠治: 氷点下における雪の屋根材への付着, 雪氷, 54巻3号, pp.269~275, 1992.9
- 8) 渡辺正明: 屋根葺材の滑雪特性に関する基礎的研究, 学位論文(東北大学), pp.98-139, 1990.6
- 9) 伊東敏幸, 苔米地司, 星野政幸: 劣化した屋根用塗装鋼板の表面性状と滑雪性について, 日本雪工学会誌, vol.10, No.2, pp.2~10, 1994.4
- 10) 苔米地司, 伊東敏幸, 星野政幸: 各種屋根葺材と屋根雪との凍着性状について, 第9回日本雪工学会大会論文報告集, pp.119~122, 1993.1
- 11) 苔米地司, 山口英治, 伊東敏幸, 星野政幸: 膜構造物の雪処理に関する基礎的研究, 日本建築学会構造系論文報告集, 第426号, pp.99~105, 1991.8
- 12) 吉田光則, ほか8名: 着雪氷防止技術に関する研究(1) 各種材料の着氷力について, 北海道の雪氷, 第12号, pp.24~26, 1993.8
- 13) 伊東敏幸, 苔米地司, 星野政幸: 屋根雪滑雪に及ぼす屋根葺工法の影響, 日本建築学会北海道支部研究報告集, No.67, pp.17~20, 1994.3
- 14) 川上俊一, 伊東敏幸, 苔米地司: 降雪時の温度条件からみた屋根葺材と屋根雪の凍着過程, 第10回日本雪工学会大会論文報告集, pp.169~172, 1994.1
- 15) 田口龍雄: 雪, 古今書院, pp.41-45, 1940
- 16) 日本化学会編: 新実験化学講座18 界面とコロイド, 丸善, pp.102-106, 1979
- 17) 佐々木恒孝, ほか3名: 界面現象の基礎, 朝倉書店, pp.203-206, 1973

(1994年7月8日原稿受理, 1995年2月1日採用決定)